

다중 홉 무선 메쉬 네트워크에서 최적 경로에 관한 연구

정회원 김성관*, 준회원 이옥환*, 정회원 이성주**, 종신회원 최성현*

Studying Route Optimality in Multi-Hop Wireless Mesh Networks

Seongkwan Kim* *Regular Member*, Okhwan Lee* *Associate Member*,
Sung-Ju Lee** *Regular Member*, Sunghyun Choi* *Lifelong Member*

요 약

이 논문은 멀티 홉 무선 메쉬 네트워크에서 제공하는 라우팅 프로토콜이 적용된 라우팅 metric에 따라 최적의 경로를 얼마나 잘 찾는가에 관한 논문이다. 최근에 제시된 라우팅 metric은 Link Quality (LQ) 를 정확히 나타내도록 설계되어있지만, 많은 metric들은 그것을 기반으로 찾은 경로들이 얼마나 많은 비율로 최적의 경로를 찾을 수 있는지에 대해서 검증하지 않았다. 우리는 최근에 잘 디자인된 라우팅 metric들과 가장 많이 사용되는 라우팅 프로토콜의 다양한 조합을 고려하였다. 그리고 각각의 라우팅에서 찾은 경로의 최적 정도를 살펴보았습니다. 또한 무선 링크의 비대칭성을 반영한 metric을 위해서 단 방향성을 가지는 라우팅 프로토콜을 제안한다. 시뮬레이션을 통해서 만들어진 최적 경로의 비율이 살펴본 모든 라우팅 metric 및 프로토콜 그리고 네트워크 구조에 대해서 네트워크 트래픽 양에 따라 감소하는 현상을 알 수 있다.

Key Words : Wireless Mesh Network, Route optimality, Link Quality metric, AODV, ODLR

ABSTRACT

This paper investigates how many optimal routes can be established in terms of a given wireless mesh routing metric. Although many of routing metrics have been devised to precisely derive the wireless link quality in mesh, most (if not all) metrics have not been evaluated their optimality along with routing protocols. We consider state-of-the-art routing metrics and a widely accepted routing protocol in order to observe the optimality of established routes varying the number of source nodes. Also, we propose a unidirectional routing to deal with possible link asymmetry feature in wireless links. Through comparative simulation evaluations, we show that the portion of optimally established routes becomes less as the network traffic load increases, regardless of employed metrics, network topologies, and routing protocols.

1. 서 론

무선 메쉬 네트워크는 최근 들어 연구와 실제 구현 및 설치에 많은 관심을 받고 있는 분야이다. 무선 메쉬 네트워크는 가정이나 커뮤니티 단체 또는 기업 네트워크의 매력적인 해결책으로 각광받고 있다. 이는 설치도 용의할 뿐만 아니라 비용도 적게

들며 자동 환경 설정 등의 많은 장점이 있기 때문이다. 일반적으로 무선 네트워크는 게이트웨이 노드들과 MPs (mesh mpints), MAPs (mesh access points), 무선 클라이언트로 구성된다. 게이트웨이 노드는 유선을 통해서 외부 인터넷망과 연결되고 게이트웨이 노드와 MP와 MAP들은 무선을 통해서 통신이 이루어지고 무선 백본의 역할을 가진다. 무

* 서울대학교 전기공학부 멀티미디어 무선통신망 연구실 ((skim, ohlee, schoi}@mwnl.snu.ac.k)

** Mobile & Media Systems Lab, Hewlett-Packard Laboratories (sjlee@hp.com)

논문번호 : KICS2008-07-297, 접수일자 : 2008년 7월 2일, 최종논문접수일자 : 2008년 11월 12일

선 클라이언트들은 MAP들에 접속함으로써 백본 네트워크를 사용할 수 있게 된다.

무선 네트워크는 백본망으로서의 역할을 하기 위해 높은 네트워크 throughput을 사용자에게 제공해야 한다. 최근 연구는 주로 이러한 네트워크 성능을 높이는데 초점을 맞추고 있다. 애드혹 네트워크와는 다르게 고정되며 안정된 전력을 공급받는 네트워크는 이동성과 에너지 효율은 큰 관심분야가 아니다. 반면, 다중 채널 및 다중 라디오가 무선의 성능 한계점을 극복하기 위하여 제안 되고 있다.

라우팅 또한 이런 네트워크 성능 향상을 위해 중요한 부분이다. 특히 무선 네트워크 환경에서는 무선 채널 품질을 반영하는 Metric들을 사용할 경우^{[11]-[13]} 전통적으로 사용되는 최소 hop count를 사용할 때 보다 더 좋은 성능을 보인다^[14]. 반면에 MANET(Mobile ad hoc networks) [15] 에서 널리 활용되던 라우팅 프로토콜들을 다른 metric에 적용시켰을 때 경로의 최적 비율을 비교한적이 없다. 다시 말해서 경로의 최적 비율은 다양한 조합의 metric과 프로토콜을 사용했을 때 얼마나 많은 최적 경로가 만들 수 있는지를 의미한다.

이 논문에서 우리는 AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) [16] 라우팅이 다양한 환경에서 얼마나 적합한지를 알아보았다. 우리는 AODV에 최신 라우팅 metric인 ETX (Expected Transmission Count)와 ETT (Expected Transmission Time)를 적용시켜 연구하였다. 이전에 발표 되었던 MANET에 관한 연구 내용을 살펴보면 broadcast flooding은 broadcast 패킷을 자주 발생 시켜 문제를 야기한다. 이를 broadcast storm problem 이라고 한다^[17]. Hop count metric을 주로 사용하는 AODV는 RREQ (Route Request)에 broadcast flooding을 적용함으로써 broadcast storm problem을 가지고 있다. 우리는 이러한 broadcast storm problem이 AODV가 보다 진보된 metric을 사용할 때 더 큰 문제를 발생시킬 수 있게 되었다. 이는 ETX와 ETT같이 진보된 metric은 [14]에서 보여준 것처럼 더 많은 홉의 경로를 가지는 경향이 있고 Broadcast 패킷은 더 많은 홉을 거칠수록 충돌되기 쉽기 때문이다. 또한 최적 경로 문제에서 broadcast flooding의 충돌은 더욱 심해진다. 게다가 우리는 무선 링크의 비대칭성이 반영되는 라우팅 프로토콜을 만들기 위해 route unidirectionality로 일컬어지는 새로운 라우팅 방법을 제안한다. 그리고 다양한 조합의 라우팅 metric과 프로토콜, 네트워크 구조에서 시뮬레이션

을 하였고 사용된 metirc과 네트워크 구조, 라우팅의 양/단방향성에 상관없이 네트워크 트래픽 양이 증가함에 따라 만들어지는 최적 경로의 비율이 적어짐을 관찰하였다. 또한 일반적으로 ETT가 더 긴 홉의 경로를 만들기 때문에 경로 최적률 관점에서 ETX보다 안 좋은 성능을 보이는 경향이 있을 것이다.

논문의 구조는 다음과 같다. II장에서는 라우팅 metric과 프로토콜에 대해서 살펴보고 III장에서는 새로운 특성을 라우팅을 제안한다. IV장에서는 시뮬레이션 결과를 분석하고 V장에서 결론을 내린다.

II. 라우팅 METRIC과 프로토콜

일반적으로 경로는 다중 홉이고 네트워크의 성능은 이러한 경로에 큰 영향을 받는다. 최근 대부분의 연구는 LQ를 반영하는 metirc을 잘 디자인하여 최대 throughput을 얻는 경로를 찾는 것에 초점이 맞춰져 있다. 그리고 라우팅 프로토콜은 그것으로 효율성을 검증해 왔다. 이번 장에서는 우리는 최신 라우팅 metric과 프로토콜들이 네트워크에서 얼마나 잘 동작할지 알아 볼 것이다.

2.1 ETX

ETX는 한 링크에 대해서 하나의 패킷을 성공적으로 보내기위해 기대되는 재전송을 포함한 전송 횟수를 말한다. ETX를 구하기 위해서는 먼저 해당 링크의 정방향과 역방향의 성공적인 패킷 전송률을 측정해야 한다. 이렇게 측정된 정방향 전송 성공률 (d_f)은 data 패킷 전송 성공 확률이다. 반면 역방향 전송 성공률 (d_r)은 ACK 패킷의 전송 성공 확률이다. 그러므로 한 번의 전송에 대한 전송 성공 확률은 data와 ACK이 모두 성공해야 하므로 $d_f \times d_r$ 이 된다. 재전송을 포함한 각 전송이 이전 전송과 독립적이라면 우리는 이러한 전송시도를 Bernoulli trial 이라고 볼 수 있다. 이를 통해 한 패킷의 성공적인 전송을 위해 기대되는 전송 횟수는 아래와 같다.

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r}. \quad (1)$$

정수 기반이었던 기존의 최소 hop count와 다르게 ETX는 하나의 무선 링크 metric을 실수 값으로 표현 한다. 그러나 d_f 나 d_r 은 최저 전송 속도로 보내지는 Hello 메시지를 기반으로 구해지며 이는 다양한 전송 속도로 보내지는 data 패킷에 적용될 시 잘못된 정보가 될 수도 있다. 따라서 ETX는 다중

전송 속도 링크에 대해서 잘못된 판단을 내릴 수 있다. 그리고 ETX는 다른 LQ metric들에 비해서 더 작은 홉 경로를 선호하는 특성을 가지고 있다.

2.2 ETT

ETT는 ETX에 전송 속도를 곱하여 구해진 metric으로 하나의 data 패킷을 성공적으로 보내기 위해 필요한 시간을 의미한다. 그러므로 아래와 같은 형태를 얻을 수 있다.

$$ETT = ETX \times \frac{S}{R}, \quad (2)$$

S는 data 패킷의 size 이고 R은 그 링크의 data 전송 속도이다. ETT는 전송 속도를 반영함으로써 보다 정확한 무선 LQ를 나타내지만 프로토콜 overhead나 contention based access와 같은 다른 중요한 802.11의 특징은 반영하지 못하고 있다.

2.3 AODV

AODV는 효율적인 on-demand 방식의 라우팅 프로토콜로 MANET에서 각광 받아왔다^{[15][18]}. 한 노드가 중단 간 경로를 찾기 위해서는 broadcast RREQ (Route Request) packet을 보내야한다. 그리고 RREQ를 받은 경유지 (intermediate) 노드들은 자신으로부터 RREQ 근원지 (source) 노드까지의 경로를 자신의 라우팅 테이블에 반영한다. 또한 필요하다면 해당 RREQ를 re-broadcast 한다. 그리고 목표지 (destination) 노드가 RREQ를 받으면 자신의 라우팅 테이블을 갱신하고 RREP (Route Reply) 패킷을 unicast 방식으로 근원지 노드에 전송한다. RREP가 거쳐 가는 경유지 노드들은 RREQ를 받았을 때 만들어진 라우팅 테이블을 기반으로 RREP를 근원지 노드까지 전달한다. 뿐만 아니라 목표지 노드까지의 경로도 RREP를 통해서 라우팅 테이블에 반영한다. 마지막으로 RREP가 근원지 노드에 도착하면 end-to-end 경로가 완성된다. 추가적으로 중간지 노드들은 양 끝 노드로 패킷을 전송 할 수 있는 경로를 알 수 있고 이를 route bidirectionality 라고 부른다.

한 노드가 RREQ를 받으면, 그 노드는 RREQ 패킷에 포함된 bid (broadcast ID)를 보고 다음 과정을 할지 아니면 버릴지를 결정한다. 만약 해당 bid를 가진 RREQ를 받은 적이 없다면 그 노드는 RREQ를 re-broadcast한다. RREQ를 re-broadcast하기 전에 RREQ가 최신의 것이거나 같은 sequence

number를 가지고 있지만 metric이 더 작다면 라우팅 테이블에도 반영한다. RREP를 받았을 때도 RREQ의 경우와 같은 방법으로 라우팅 테이블을 관리한다. 하나의 RREQ를 보내거나 받을 때 근원지 노드와 목표지 노드는 자신의 sequence number를 증가시킨다.

위에서 설명하였듯이 고려하고 있는 라우팅 metric들은 무선 Link quality (LQ) 를 잘 반영하고 있고 이들은 일반적으로 end-to-end 경로에 따라 전체 홉으로 사용된다.

III. 새로운 특성을 가진 라우팅

AODV는 무선 네트워킹에서 가장 대표적인 라우팅 프로토콜이다^[19]. 이번 장에서는 최근 IEEE 802.11s draft에서 제안하는 AODV 수정본을 참고하여 라우팅이 고려해야할 기능에 대해서 논의한다.

3.1 수신한 RREQ에 대한 metric 비교

기존의 AODV와 달리 IEEE 802.11s draft¹⁾는 라우팅 metric을 비교 기준으로 추가하고 있다. RREQ를 받을 때 RREQ가 최신의 것인지 아닌지를 bid (broadcast ID)를 보고 판단하고 중복된 RREQ에 대해서는 metric 값에 대한 비교도 추가되어 있다.

Hop count를 metric으로 사용할 때는 shortest-hop path를 선호하기 때문에 이런 중복된 RREQ에 대한 관리가 필요하지 않다. 하지만 LQ가 반영된 metric을 사용할 경우 같은 bid를 가진 RREQ의 수신을 무시하는 것은 적합한 방법이 아니다. 이러한 새로운 기능의 부작용으로 broadcast storm problem이 더욱 심해진다. 이러한 trade-off 에도 불구하고 더 정확한 라우팅 metric 비교를 위해서 수신한 모든 RREQ들에 대해서 이를 수행해야한다.

3.2 Route unidirectionality

링크는 비대칭성을 가지고 있다. 이는 무선에서 방향에 따라 서로 다른 품질을 가지고 있다는 것을 의미한다. 이는 무선 네트워킹에서 널리 알려진 사실이다. 그리고 최근 관련 논문은 이런 현상에 대해 연구하였다^{[20][21]}. 그러나 링크 비대칭 특성은 라우

1) 802.11s에서 제안하는 필수 라우팅 프로토콜은 HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)이다. 이것은 AODV와 트리 기반의 proactive 라우팅 프로토콜[19]의 조합이다. 후자는 라우팅 metric 기반으로 동작하지 않기 때문에 우리는 AODV 수정 버전에 대해서만 언급한다.

팅 프로토콜에서도 고려되어야 한다.

알려진 모든 ad hoc/mesh 라우팅 프로토콜들은 대칭 링크를 가정한다. 이는 기존의 AODV와 802.11s draft 버전도 다르지 않다. 이 논문에서는 이러한 특성을 route unidirectionality 라고 부르고 링크가 비대칭 특성을 고려한 새로운 AODV 버전을 제안하고 이것의 ODLR (On-demand Directional Link quality-aware Routing) 이라고 한다.

1) SNR 기반의 link quality metric measurement: 일반적으로 무선 네트워크에서 Hello 패킷은 이웃 노드의 존재 유무파악을 위해서 사용될 뿐 만 아니라 전송 확률 및 metric (예, ETX 또는 ETT) 측정을 위해서 사용된다^{[1][12][20]}. 그러나 이웃 노드의 개수와 사용 가능한 PHY 속도에 따라 측정 overhead가 급격히 증가한다.

이 논문에서 우리는 새로운 측정 방법론을 제시한다. 적은 overhead로 높은 정확도를 유지하는 방법이다. PHY가 정확한 noise 정도를 알수 있다고 가정하면 우리는 정확한 SNR (Signal-to-Noise Ratio)를 측정할 수 있다²⁾. 우리는 또한 수신한 패킷의 PER (Packet Error Rate, p_e)을 계산하기 위하여 PHY 계층이 각각의 전송 속도에 따른 BER (Bit Error Rate) vs. SNR 테이블을 가지고 있다고 가정한다. 따라서 d_s 와 d_r 는 각각 $1-p_e^{data}$ 와 $1-p_e^{ACK}$ 로 구할 수 있으며, 이를 가지고 ETX와 ETT metric을 식 1.과 2.로 얻을 수 있다.

2) 수신자 중심의 metric 관리: 기존의 metric 유지 관리는 Hello 송신측에서 되어왔다. 이와 다르게 우리는 수신자 중심의 metric management를 제안한다. α 를 송신자 β 를 수신자라고 하고 그 사이의 링크를 $\vec{\alpha\beta}$, 그리고 β 에 의해서 측정된 품질은 $LQ_{\alpha\beta}$ 라고 하자. $LQ_{\alpha\beta}$ 를 α 로 feedback 해주는 대신에 β 에서 관리하는 것을 수신자 중심 방법이다.

예전의 방법에서는 LQ 정보를 보내기 위해서 이웃 노드의 숫자에 따라 Hello 메시지의 크기가 증가한다. 그리고 LQ 측정 overhead가 $O(n^2)$ 이다. 반면 우리가 제시한 방법은 측정된 품질을 전송할 필요가 없기 때문에 $O(n)$ 의 overhead를 가진다.

3) ODLR의 경로 찾기: ODLR의 경로 찾기 과정은 그림 1에서 잘 설명하고 있다. 이 그림에서 전송 범위는 가장 인접한 노드에게만 가능한 거리로

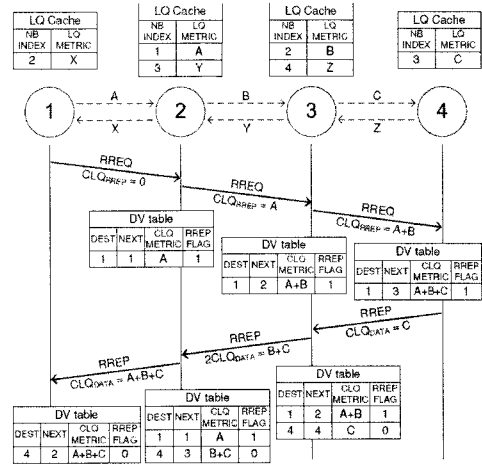


그림 1. ODRL 경로 선택 예제: 4개의 노드가 일렬로 배치되어 있다. 1번이 근원지 노드로 목적지 노드인 4번 노드까지의 경로를 만든다

가정한다. LQ 정보는 충분한 시간이 흐른 뒤 이므로 준비가 완료된 상태이다.

저장된 정보는 unidirectional link metric 이다. 예를 들어 그림 1에서 노드 2의 LQ Cache는 LQ metric A와 Y를 저장한다.

노드 1은 경로 찾기 과정을 시작하기 위해서 RREQ message를 broadcast한다. 이때 RREQ 메시지가 CLQ_{RREQ} (cumulative link quality)를 0으로 세팅한 뒤 전송한다. CLQ_{RREQ} 가 의미하는 것은 RREP를 보내기 위해 사용될 경로를 위한 metric이라는 것이다. 노드 2가 RREQ를 받으면 RREQ를 rebroadcast 하기 전에 LQ cache정보를 기반으로 노드2는 자신의 Distance Vector 기반의 라우팅 테이블을 업데이트 한다. 기존의 AODV의 경우 한번의 RREQ 수신만으로 노드 2가 노드 1까지 보내는 경로를 만들 수 있다. 하지만 이러한 AODV의 효율성은 unidirectional link quality metric과 함께 사용되지 못한다. 즉, 이렇게 만들어진 역방향 경로는 RREP 전송을 위해서만 사용되어야 한다. 이것을 위해서 라우팅 테이블에 RREP flag 영역을 추가하고 RREQ를 받아 라우팅테이블을 갱신할 때 이 flag를 1로 설정한다.

노드 2는 CLQ_{RREQ} 에 링크 12의 metric 정보를 더하여서 RREQ를 re-broadcast 한다. 결국 노드 4가 RREQ를 받으면 경로에 따라 누적된 LQ 정보, $CLQ_{RREQ} = A+B$, 를 얻을 수 있다. 그 노드는 LQ Cache를 참조하여 종단 간의 link metric $A+B+C$ 을 라우팅 테이블에 반영한다. 그리고 RREP를 위

2) IEEE 802.11n draft의 closed-loop rate adaptation에서도 이러한 디바이스를 가정하고 있으므로 이는 실현 가능한 PHY의 기능이다.

과정을 통해 선택된 경로를 통해서 unicast로 전송한다. RREP는 CLQ_{DATA} 영역을 추가하여 정방향 경로의 metric도 실어서 보낸다. 이를 기반으로 중간지 노드들과 근원지 노드는 자신의 라우팅 테이블에 반영한다.

IV. 최적 경로에 관한 연구

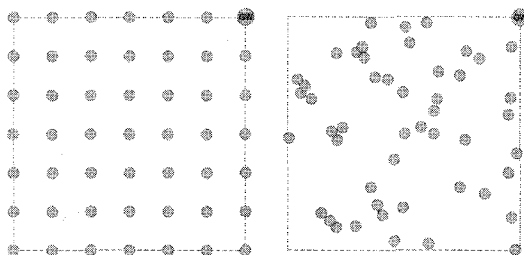
이 장에서는 우리가 다양한 metric과 프로토콜 및 네트워크 구조에 따라 만들어진 경로의 최적률에 대한 시뮬레이션 결과 및 이에 대한 검증을 다룬다.

4.1 시뮬레이션 환경

우리는 다음과 같이 3개의 분류에서 각각 2개의 항목을 가지고 비교를 하였다.

- Metric: ETX and ETT,
- Protocols: AODV (IEEE 802.11s version of AODV) and ODLR,
- Topologies: square grid 과 square random

고려한 네트워크 구조에 대한 그림 2에서 볼 수 있다. 각 토폴로지에서 게이트웨이는 오른쪽 위에 위치하며 모든 트래픽의 목적지는 게이트웨이이다. Square grid에서 노드 간격은 15m이다. 그리고 모든 노드는 $90m \times 90m$ 사각형 안에 위치한다.



(a) Square grid.

(b) Square random.

그림 2. 두 개의 $90m \times 90m$ 사각형에 노드들이 격자형과 산개형으로 배치되어 있다. 게이트웨이는 두 경우 모두 오른쪽 위쪽에 자리 잡고 있다

4.2 시뮬레이션 설정

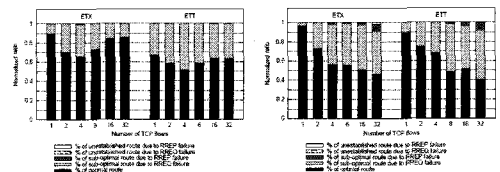
다양한 시나리오의 시뮬레이션을 ns-2 simulator^[23]에서 수행하였다. 고려한 다양한 조합의 환경을 위해 IEEE 802.11s AODV, ODLR, RBAR (Receiver-Based Auto Rate) [24], IEEE 802.11a PHY를 구현하여 ns-2에 적용 시켰다. 패킷은 TCP

를 이용하여 근원지 노드로부터 목적지 노드까지 전송하였다. 각 노드의 전송 파워는 20 dBm이고 노이즈는 -93 dBm이다. 그리고 실내 환경에 적당한 log-distance path-loss 모델을 사용하였고 path-loss exponent는 4로 하였다^[25]. 모든 시뮬레이션에서 AWGN 무선 채널을 가정하였다.

게다가 비교를 위해서 우리는 manual routing protocol을 구현하였다. 이는 시뮬레이션을 시작하기 이전에 각 노드가 사용 가능한 모든 링크의 routing metric을 계산하고 미리 최적의 metric 값을 공동 저장소에 저장한다. 그리고 Dijkstra 알고리즘을 사용하여 각 노드는 다른 모든 노드로 가는 최적의 경로를 미리 계산한다. 이렇게 찾아진 최적경로를 AODV, ODLR과 비교하였다. 이렇게 비교하여 optimal, sub-optimal, non-established 경로로 구분하였다. 뿐만 아니라 sub-optimal 및 non established 경로를 발생 원인에 따라 RREQ, RREP 실패로 분류 하였다.

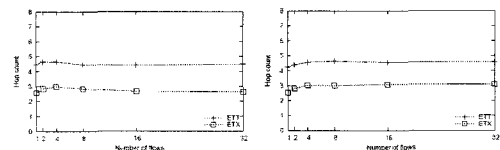
4.3 Square grid topology

그림 3은 grid topology 상황에서 AODV/ODLR 과 ETX/ETT의 조합에 따른 결과를 보여준다. 가로 축은 TCP flow의 개수이고 막대그래프에서 각 색깔의 길이는 서로 다른 결과의 비율을 나타낸다. 예를 들어 그림 3(a)의 가장 왼쪽 막대의 경우 90%가 optimal 경로를 10%가 sub-optimal 경로를 찾은 것을 알 수 있다. 또한 각 결과를 만들기 위해서 30번의 임의의 시뮬레이션을 하였으므로 이 경우



(a) The optimal portion of routes with AODV.

(b) The optimal portion of routes with ODLR.



(c) Hop counts with AODV.

(d) Hop counts with ODLR.

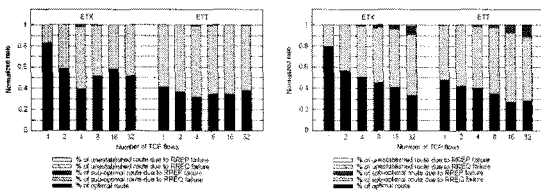
그림 3. Square grid topology에서 요청된 모든 종단 간 경로 중 optimal/sub-optimal/unestablished 경로의 비율과 평균 hop 수

sub-optimal 경로가 3개임을 의미한다.

흥미로운 점은 모든 조합에 대해서 100%의 optimal 경로를 찾을 수 없었다. 이것은 아무리 좋은 routing metric을 사용한다 할지라도 최적 경로를 보장하지 못한다는 것을 나타낸다. 대체로 ODLR의 경우 flow의 개수가 증가함에 따라 최적 경로의 수가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 반면 AODV의 경우 다른 경향을 보여준다. 이는 RERR message에 의한 bidirectional 특성 때문이다. 만약 하나의 링크가 깨진 것으로 인식되면 RERR 메시지가 전체 네트워크로 뿌려진다. 만약 목적지 노드인 게이트웨이가 이것을 받으면 다시 경로를 찾기 위해 RREQ를 전송한다. 이러한 AODV의 bidirectional한 특성 때문에 RREQ를 받은 모든 노드는 다시 게이트웨이까지의 경로를 만들 수 있다. 이러한 동작은 route flapping 문제를 야기하여 네트워크 성능을 감소시킨다. 이런 문제를 일으키는 RERR이 때로는 잘못된 판단에 의해 전송된다. 즉 RERR이 노드가 사라진 것이 아닌 Hello message의 3번의 연속적인 충돌에 의해서 발생 할 수 있다. 우리는 ODLR에서 이러한 특성은 제거하였고 이 원인으로 최적 경로의 측면에서 flow가 증가함에 따라 성능이 감소한 것을 볼 수 있다.

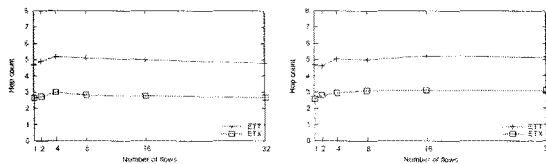
4.4 Square random topology

노드들을 사각 토폴로지에 랜덤하게 분포시키고 성능을 살펴보았다. 우리는 AODV의 grid topology에 비해서 최적 경로의 비율이 줄어든 것을 알 수



(a) The optimal portion of routes with AODV.

(b) The optimal portion of routes with ODLR.



(c) Hop counts with AODV.

(d) Hop counts with ODLR.

그림 4. Square random topology에서 요청된 모든 종단 간 경로 중 optimal/sub-optimal/unestablished 경로의 비율과 평균 hop 수

있다. 그리고 AODV의 bidirectionality가 이 토폴로지 환경에서 제대로 동작하지 않은 것을 관찰하였다. 그리고 asymmetric 무선 링크를 반영할 경우 잘못 동작하는 AODV에 대해서 논의해야한다. 마지막으로 그림 3과 4에서 ETT에 비해 상대적으로 더 긴 홉을 선호하는 ETT같은 metric이 최적 경로의 비율이 낮음을 볼 수 있다.

V. 결론

이 논문은 다양한 routing metric에 대해서 만들어진 최적 경로의 비율에 대해서 연구하고 있다. 우리는 다양한 조합의 routing metric과 protocol 그리고 topology에서 비교하였다. 또한 이러한 비교를 위해 unidirectional을 반영하는 새로운 라우팅 프로토콜 (ODLR)을 제안하였다. 우리는 최신 라우팅 metric과 protocol을 고려하였으며 이것은 네트워크 부하의 증가에 따라 최적 경로의 비율이 줄어듦을 확인하였다. 앞으로 우리는 asymmetric link 환경에서 ODLR의 성능 향상을 보여줄 것이다. 더 나아가 unestablished 와 sub-optimal 경로를 줄이기 위한 새로운 방법론을 제시할 것이다.

참고 문헌

- [1] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang "Wireless Mesh Networks: A Survey," Computer Networks Journal, Vol.47, pp.445-487, 2005.
- [2] Bruno, M. Conti, and E. Gregori, "Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks," Vol.43, No.3, pp.123-131, Mar. 2005.
- [3] Seattle Wireless. [Online]. Available: <http://www.seattlewireless.net/>
- [4] MIT Roofnet. [Online]. Available: <http://pdos.csail.mit.edu/roofnet/>
- [5] MSR: Self-Organizing Neighborhood Wireless Mesh Networks. [Online]. Available: <http://research.microsoft.com/mesh/>
- [6] Mesh Dynamics. [Online]. Available: <http://www.meshdynamics.com/>
- [7] Tropos Networks. [Online]. Available: <http://www.tropos.com/>
- [8] Champaign-Urbana Community Wireless Net-

- work [Online]. Available: <http://www.cwireless.net/>
- [9] P. Kyasanur, J. So, C. Chereddi, and N. H. Vaidya, "Multichannel Mesh Networks: Challenges and Protocols," *IEEE Wireless Commun. Mag.*, Vol.13, No.2, pp.30-36, Apr. 2006.
- [10] P. Bahl, A. Adya, J. Padhye, and A. Wolman, "Reconsidering Wireless Systems with Multiple Radios," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review (CCR)*, Vol.34, pp.39-46, Oct. 2004.
- [11] D. S. J. De Couto, D. Auayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Networks," in *Proc. ACM MobiCom*, San Diego, CA, USA, Sep. 2003, pp.134-146.
- [12] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks," in *Proc. ACM MobiCom*, Philadelphia, PA, USA, Sep. 2004, pp.114-128.
- [13] J. Bicket, D. Aguayo, S. Biswas, and R. Morris, "Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network," in *Proc. ACM MobiCom*, Cologne, Germany, Aug. 2005.
- [14] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Comparison of Routing Metrics for Static Multi-Hop Wireless Networks," in *Proc. ACM SIGCOMM*, Portland, OR, USA, Sep. 2004, pp.133-144.
- [15] IETF MANET Working Group. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [16] C. E. Perkins and E. M. Belding-Royer, "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," in *Proc. IEEE WMCSA*, New Orleans, LA, USA, Feb. 1999, pp.90-100.
- [17] S.-Y. Ni, Y.-C. Tseng, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, "The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network," in *Proc. ACM MobiCom*, Seattle, WA, USA, 1999, pp.151-162.
- [18] C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer, and S. R. Das, "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," IETF RFC 3561, 2003.
- [19] IEEE 802.11s/D1.06, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Mesh Networking, IEEE Std., Jul. 2007.
- [20] K.-H. Kim and K. G. Shin, "On Accurate Measurement of Link Quality in Multi-Hop Wireless Mesh Networks," in *Proc. ACM MobiCom*, Los Angeles, CA, USA, Sep. 2006, pp.38-49.
- [21] L. Sang, A. Arora, and H. Zhang, "On Exploiting Asymmetric Wireless Links via One-way Estimation," in *Proc. ACM MobiHoc*, Montr'eal, Quebec, Canada, Sep. 2007, pp.11-21.
- [22] IEEE 802.11n/D2.0, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Enhancements for Higher Throughput, Draft Supplement to IEEE, Feb. 2007.
- [23] The Network Simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [24] G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl, "A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks," in *Proc. ACM MobiCom*, Rome, Italy, Jul. 2001, pp.236-251.

김성관 (Seongkwan Kim)

정회원



2000년 2월 고려대학교 전자공학과(학사)

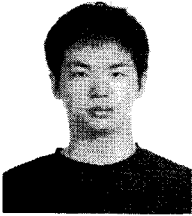
2002년 2월 고려대학교 전자컴퓨터 공학과(석사)

2004년 3월~현재 서울대학교 전기공학부 박사과정

<관심분야> 무선통신망

이 옥 환 (Okhwan Lee)

준회원

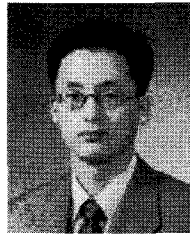


2006년 2월 서울대학교 전기공학부(학사)

2007년 3월~현재 서울대학교 전기공학부 석사과정
<관심분야> 무선통신망

최 성 현 (Sunghyun Choi)

중신회원



1992년 2월 한국과학기술원 전 기전자공학과 (학사)

1994년 2월 한국과학기술원 전 기전자공학과 (석사)

1999년 9월 미시간대학교 전기 컴퓨터공학과 (박사)

1999년 9월~2002년 8월 미국

필립스 연구소 선임연구원

2002년 9월~현재 서울대학교 전기공학부 부교수

<관심분야> 무선통신망, 이동통신망

이 성 주 (Sung-Ju Lee)

정회원



1996년 2월 한양대학교 전자계 산학과 (학사)

1998년 6월 Univ. of California, Los Angeles (UCLA) 컴퓨터 공학 (석사)

2000년 9월 Univ. of California, Los Angeles (UCLA) 컴퓨터 공학 (박사)

2000년 10월~현재 미국 Hewlett-Packard Labs, Senior Research Scientist

<관심분야> 무선네트워크, 인터넷